

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
22. September 2005 (22.09.2005)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2005/088826 A1

(51) Internationale Patentklassifikation⁷: **H02P 6/18**
(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2005/051017
(22) Internationales Anmeldedatum:
7. März 2005 (07.03.2005)

(25) Einreichungssprache: Deutsch
(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2004 012 805.7 16. März 2004 (16.03.2004) DE

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von
US): **SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT** [DE/DE];
Wittelsbacherplatz 2, 80333 München (DE).

(72) Erfinder; und
(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): **FINKLER, Roland**
[DE/DE]; In der Zeil 6, 91058 Erlangen (DE). **KÖPKEN,**
Hans-Georg [DE/DE]; Hausäckerweg 35, 91056 Erlangen
(DE).

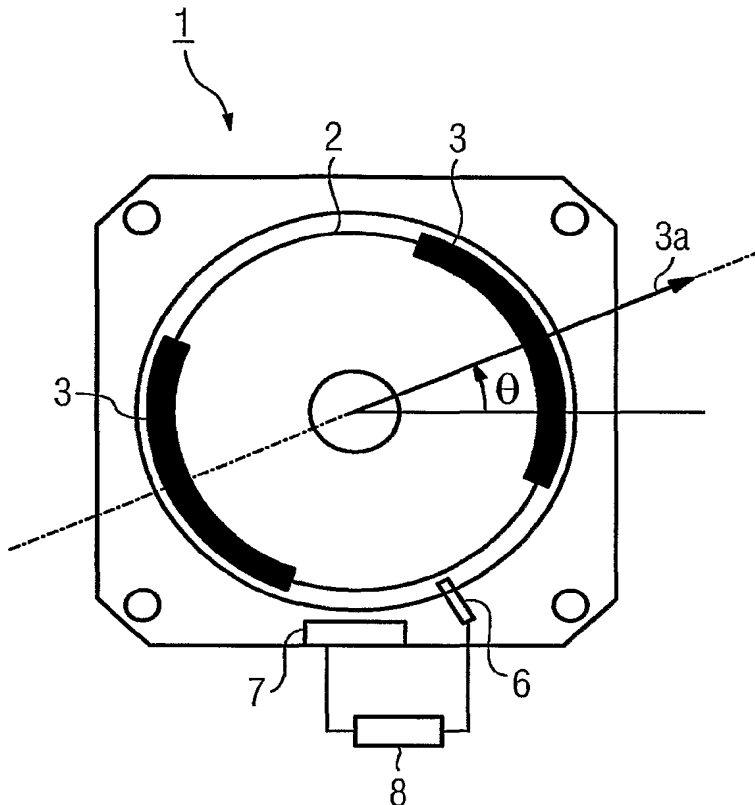
(74) Gemeinsamer Vertreter: **SIEMENS AKTIENGE-**
SELLSCHAFT; Postfach 22 16 34, 80506 München
(DE).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL,
AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH,
CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES,
FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE,

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: METHOD AND DEVICE FOR DETERMINING THE ROTOR POSITION OF AN ELECTRIC MOTOR

(54) Bezeichnung: VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUR BESTIMMUNG DER ROTORLAGE EINES ELEKTROMO-
TORS



(57) Abstract: The invention relates to a method for determining the angular position (θ) of a rotor (2) pertaining to an electric motor (1) and comprising a number of pairs of poles. Said method consists of the following steps: a pulse pattern (PM1, PM2, PM3) with a pulse duration (T) flows through at least one stator coil (7) of the electric motor (1), such that the rotor (2) does not rotate by more than 90° , divided between the number of pairs of poles, during the pulse duration (T); the angular acceleration (α) of the rotor (2), caused by the pulse pattern flowing through the at least one stator coil, (7) is detected; and the angular position (θ) of the rotor (2) is determined by means of the correlation between the flow through the stator coil (7) and the angular acceleration (α) of the rotor (2).

(57) Zusammenfassung: Ein Verfahren zur Bestimmung der Winkellage (θ) eines eine Polpaarzahl aufweisenden Rotors (2) eines Elektromotors (1) umfasst folgende Schritte: Bestromung mindestens einer Statorwicklung (7) des Elektromotors (1) mit einem Pulsmuster (PM1, PM2, PM3) einer Pulsdauer (T) derart, dass der Rotor (2) während der Pulsdauer (T) um nicht mehr als 90° geteilt durch die Polpaarzahl

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2005/088826 A1



KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, MC, NL,

PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

- mit internationalem Recherchenbericht
- vor Ablauf der für Änderungen der Ansprüche geltenden Frist; Veröffentlichung wird wiederholt, falls Änderungen eintreffen

Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.

Verfahren und Vorrichtung zur Bestimmung der Rotorlage eines Elektromotors

5

Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Bestimmung der Rotorlage eines Elektromotors, insbesondere eines bürstenlosen Elektromotors. Ein Verfahren zur Steuerung eines Elektromotors, bei dem die Lage eines Rotors relativ zu einem Stator bestimmt wird, ist beispielsweise aus der DE 44 37 793 C2 bekannt. Analog der hierin verwendeten Terminologie bezeichnen im Folgenden die Begriffe "Rotor" und "Stator" die funktionellen Grundelemente eines Elektromotors, welche relativ zu einem festen Koordinatensystem eine veränderliche Lage (Rotor) beziehungsweise eine feste Lage (Stator) einnehmen. Damit sind auch Linearmotoren als Elektromotoren erfasst.

Bei dem aus der DE 44 37 793 C2 bekannten Verfahren wird der Zusammenhang zwischen einem an den Elektromotor angelegten bekannten Signal und der hierdurch angeregten Bewegung des Rotors zur Lagebestimmung des Rotors genutzt, wobei die Lageänderung des Rotors beispielsweise mit Hilfe eines inkrementalen, optischen Messsystems gemessen wird. Auf eine direkte Messung der Rotorlage mittels eines Absolutmesssystems kann somit verzichtet werden. Jedoch kann, abhängig unter anderem von der Motorgeometrie, nicht nur ein Absolutmesssystems, sondern auch ein inkrementales Messsystem einen erheblichen gerätetechnischen Aufwand darstellen. Dies gilt insbesondere für Hohlwellenmotoren, wie sie beispielsweise in Kunststoff verarbeitenden Maschinen eingesetzt werden. Zum anderen stellt beim Verfahren nach der DE 44 37 793 C2 die Größe der Amplitude der durch das angelegte bekannte Signal angeregten Bewegung oft einen Nachteil dar.

35

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zur Lagebestimmung des Rotors eines Elektromotors anzugeben, wel-

ches auf besonders rationelle Weise ohne direkte Lage- oder Lageänderungsmessung arbeitet und den Motor insbesondere nur zu sehr kleinen Bewegungen anregt. Weiter soll eine zur Durchführung des Verfahrens geeignete Vorrichtung angegeben werden.

5

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß gelöst durch ein Verfahren mit den Merkmalen des Anspruchs 1 sowie durch eine Vorrichtung mit den Merkmalen des Anspruchs 20. Die im Folgenden im Zusammenhang mit der Vorrichtung getroffenen Aussagen gelten sinngemäß auch für das Verfahren und umgekehrt. Zur Lagebestimmung des Rotors wird weder ein Absolutmesssystem noch ein inkrementales Lagemesssystem, sondern stattdessen lediglich ein Beschleunigungssensor benötigt. Die Messgröße, welche die Beschleunigung des Rotors angibt, steht mittels direkter physikalischer Zusammenhänge, bevorzugt mittels des Wirbelstromprinzips, in dem Verfahren zur Verfügung. Bevorzugt wird hierfür ein Ferraris-Sensor verwendet, wie er prinzipiell beispielsweise aus der DE 101 56 782 C1 bekannt ist.

Die Erfindung ist ein erster Linie zur Lagebestimmung des Rotors beim Anfahren eines Elektromotors vorgesehen, kann jedoch auch auf Lagebestimmungen während des laufenden Motorbetriebs angewandt werden. Im erstgenannten Fall benötigt man für den anschließenden laufenden Betrieb ein zusätzliches Messsystem für die Bestimmung von Lageänderungen. Bevorzugt handelt es sich bei dem Motor um einen Elektromotor mit Permanentmagnetrotor. Die Rotation während des Lagebestimmungsverfahrens beträgt weniger als 90° geteilt durch die Polpaarzahl des Rotors. Bevorzugt ändert sich die Lage des Rotors während der Durchführung des Verfahrens, das heißt während einer sogenannten Pulsdauer, innerhalb derer mindestens eine Statorwicklung des Elektromotors mit einem Pulsmuster bestromt wird, um nicht mehr als 2° , insbesondere um maximal ca. 1° .

In einer besonders bevorzugten Ausgestaltung wird der Stator während des Lagebestimmungsverfahrens durch mehrere linear voneinander unabhängige, insbesondere zwei zueinander orthogo-

nale Komponenten bestromt. Jede Komponente der Bestromung der Statorwicklungen weist dabei ein spezifisches Bestromungsmuster auf, wobei die Gesamtheit der Bestromungsmuster das Puls-
muster bilden. Die Bestromung, bezogen auf die einzelnen Kom-
5 ponenten, das heißt die einzelnen Bestromungsmuster, kann ent-
weder durch kontinuierliche Signale, beispielsweise Sinus-
Signale, oder durch voneinander getrennte Impulse, beispiels-
weise Rechteckimpulse, erfolgen. Unter einem Rechteckimpuls
wird in diesem Zusammenhang auch ein Impuls verstanden, der
10 nur näherungsweise eine Rechteckform aufweist.

Mittels einer Bestromung des Stators mit Rechteckimpulsen wird
der Vorteil einer einfachen rechnerischen Auswertung des er-
zeugten Beschleunigungssignals erreicht. Die Dauer eines jeden
15 Rechteckimpulses ist lang genug, um ein diesem Impuls zu-
ordenbares und eindeutig auswertbares Beschleunigungssignal zu
erhalten und zugleich derart kurz, dass sich die Rotorlage
während des Impulses, zumindest in Fällen, in denen der Rotor
zu Beginn des Lagebestimmungsverfahrens in Ruhe ist, nicht we-
20 sentlich ändert. Bevorzugt wird aus mehreren Rechteckimpulsen
unterschiedlichen Vorzeichens ein Bestromungsmuster gebildet,
welches keine oder nur eine sehr geringe Lageänderung des Ro-
tors bewirkt. Dabei werden separate Beschleunigungsmessungen
während der Dauer mindestens eines der Rechteckimpulse, vor-
25 zugsweise während der gesamten Dauer des Bestromungsmusters
durchgeführt. Eine besonders geringe Auslenkung des Rotors
während des Bestromungsimpulses wird durch einen Impuls er-
reicht, welcher einen zentralen Abschnitt eines ersten Vor-
zeichens aufweist, dem Randabschnitte des entgegengesetzten
30 Vorzeichens unmittelbar vorgeschaltet und nachgeschaltet sind.
Insbesondere sind die Parameter eines solchen aus drei Ab-
schnitten zusammengesetzten Bestromungsimpulses auf einfache
Weise derart wählbar, dass insgesamt keine bleibende Verände-
rung der Winkellage des Rotors induziert wird.

35

Der Zusammenhang zwischen der gemessenen Beschleunigung des
Rotors und der Winkellage des Rotors ist nicht eindeutig be-

stimmbar, solange lediglich die Reaktion des Rotors auf eine der linear unabhängigen, insbesondere orthogonalen Bestromungskomponenten betrachtet wird. Dies gilt unter der bei kurzen Bestromungsdauern erfüllten Voraussetzung, dass sich die Winkellage des Rotors während einer Beaufschlagung des Stators mit einem konstanten Stromimpuls nicht signifikant ändert.

Wird eine Beschleunigung des Rotors gemessen, die einen bestimmten Bruchteil einer mit der Bestromungskomponente erzielbaren Maximalbeschleunigung beträgt, so kann damit zwar ermittelt werden, um welchen Winkelbetrag der Rotor von derjenigen Winkellage abweicht, bei welcher die Maximalbeschleunigung auftritt, doch ist das Vorzeichen des Differenzwinkels auf diese Weise nicht bestimmbar. Eine eindeutige Winkelbestimmung der Rotorlage ist dagegen durch Auswertung der verschiedenen, durch die unterschiedlichen Bestromungskomponenten, d. h. Komponenten des Pulsmusters, erzeugten Beschleunigungssignale möglich. Eine einfache Auswertemöglichkeit ist vorzugsweise dadurch realisiert, dass der Stator ausschließlich dann mit einer Bestromungskomponente, das heißt einem Bestromungsmuster als Teil des Pulsmusters, angeregt wird, wenn die jeweils andere Bestromungskomponente Null ist beziehungsweise sämtliche anderen Bestromungskomponenten des Pulsmusters Null sind. Jede einzelne der zeitlich versetzten Bestromungskomponenten führt dabei zu keiner oder nur zu einer sehr geringen bleibenden Lageänderung des Rotors.

Vorzugsweise weisen beide beziehungsweise alle Bestromungsmuster innerhalb des Pulsmusters die gleiche Form auf. Damit ist die Winkellage des Rotors allein durch die Relation zwischen den durch die verschiedenen Bestromungskomponenten erzeugten Beschleunigungssignalen bestimmbar. Physikalische Größen, die den Zusammenhang zwischen der Bestromung und dem resultierenden Absolutwert der Winkelbeschleunigung beschreiben, wie die Trägheit der rotierenden Teile, können somit bei der Winkelberechnung ebenso wie beispielsweise Reibungseinflüsse unberücksichtigt bleiben. In entsprechender Weise wirken sich mess-

technische Spezifika, beispielsweise der Frequenzgang eines als Beschleunigungssensor eingesetzten Ferraris-Sensors, bei den Messungen bezüglich beider beziehungsweise aller Komponenten der Bestromung des Stators in gleicher Weise aus. Im Fall von Bestromungsmustern, die rechteckförmige Impuls mit Abschnitten entgegengesetzten Vorzeichens umfassen, ist es vorteilhaft, die Absolutwerte des Stroms in den verschiedenen Abschnitten identisch zu wählen.

Grundsätzlich ist zur Bestimmung der Winkellage des Rotors ein einziges Pulsmuster und damit eine einzige Pulsdauer ausreichend. Nach einer vorteilhaften Weiterbildung, welche insbesondere zur laufenden Rotorlagebestimmung während des Motorbetriebs, jedoch auch zur Erhöhung der Genauigkeit der Rotorlagebestimmung beim Anfahren des Motors in Betracht kommt, ist eine periodische Wiederholung der Bestromung der Statorwicklungen mit dem Pulsmuster vorgesehen.

Nachfolgend wird ein Ausführungsbeispiel der Erfindung anhand einer Zeichnung näher erläutert. Hierin zeigen:

FIG 1a, 1b einen Querschnitt durch einen Elektromotor sowie ein elektrisches Ersatzschaltbild,
FIG 2 verschiedene zur Darstellung der Bestromung des Elektromotors verwendete Koordinatensysteme,
FIG 3 ein erstes Beispiel einer Bestromung des Elektromotors,
FIG 4 ein zweites Beispiel einer Bestromung des Elektromotors und
FIG 5 ein drittes Beispiel einer Bestromung des Elektromotors.

Einander entsprechende Teile und Parameter sind in allen Figuren mit den gleichen Bezugszeichen gekennzeichnet.

In Fig. 1a ist symbolisiert der Querschnitt durch einen zweipoligen permanent erregten Synchronmotor 1, im Folgenden kurz

auch als Motor bezeichnet, dargestellt. Der Rotor 2 des Elektromotors 1 umfasst zwei Permanentmagnete 3, die zusammen einen Erregerfluss in Richtung des Pfeiles 3a erzeugen. Der in Fig. 1a eingezeichnete Winkel θ ,

5 mit $-\pi \leq \theta < \pi$,

wird dabei als Rotorlage, das heißt als Lage des Rotors 2, bezeichnet. Zur Messung der Winkelbeschleunigung α , d.h. der zweiten zeitlichen Ableitung der Rotorlage ist ein Beschleunigungssensor 6, vorzugsweise ein Ferraris-Sensor, vorgesehen.

10 Mit dem nur schematisch angedeuteten Beschleunigungssensor 6 sowie mit den in Fig. 1a ebenfalls nur beispielhaft angedeuteten Statorwicklungen 7 wirkt eine Auswerteeinheit 8 zusammen, die, wie untenstehend anhand der Fig. 3 bis 5 näher erläutert, erstens definierte Stromimpulse erzeugt, um eine Winkelbe-
15 schleunigung α des Rotors 2 zu induzieren, zweitens das vom Beschleunigungssensor 6 kommende Signal mit diesen Stromimpulsen verrechnet und daraus drittens die Rotorlage θ bestimmt. Die Statorwicklungen 7 dienen in erster Linie der Bestromung des Motors 1 während des gewöhnlichen Betriebes, d.h. zur Er-
20 zeugung einer Antriebsleistung. Die erfindungsgemäße Bestromung mit untenstehend erläuterten Pulsmustern wird additiv überlagert beziehungsweise wird einmalig vor der gewöhnliche Motorbestromung durchgeführt.

25 Die Fig. 1b zeigt das elektrische Ersatzschaltbild des Motors 1 mit drei Anschlussklemmen R, S, T und den durch diese fließenden Motorströmen i_R , i_S , i_T . Die Statorwicklungen 7 des Motors 1 sind in Fig. 1b jeweils dargestellt durch einen Widerstand 4 und eine Induktivität 5. Wie aus Fig. 1b ersichtlich,
30 handelt es sich bei der Schaltung aufgrund eines die Anschlussklemmen R, S, T über die Widerstände 4 und die Induktivitäten 5 verbindenden Knotens 9 um ein System mit zwei Freiheitsgraden.

35 Zur Erzielung einer maximalen Momentenausbeute des Motors 1, das heißt eines maximalen Drehmomentes M bei vorgegebenem

$$(i_R^2 + i_S^2 + i_T^2)^{1/2}$$

ist die Bestromung des Motors 1 passend zur Rotorlage θ zu wählen. Sofern die Motorbestromung in diesem Sinn nicht optimal auf die Rotorlage θ abgestimmt ist, sondern einem davon
 5 verschiedenen Winkel $\theta - \varepsilon$ entspricht (mit $\varepsilon < \theta$), so resultiert daraus ein um den Faktor $\cos \varepsilon$ verringertes Drehmoment. Diese Tatsache kann nun zur Bestimmung der Winkellage θ des Rotors 2 genutzt werden, indem der Motor 1 auf nachstehend noch näher erläuterte Weise gezielt teilweise unpassend zur Rotorlage θ
 10 bestromt und das resultierende Drehmoment M analysiert wird. Unmittelbar gemessen wird dabei nicht das Drehmoment M , sondern die dazu zumindest annähernd proportionale Winkelbeschleunigung α des Rotors 2.

Bei Bestromung des Motors 1 mit den Motorströmen i_R , i_S , i_T erzeugt der Motor 1 ein Drehmoment M , welches von den Motorströmen i_R , i_S , i_T und von der Rotorlage θ abhängt. Das auf den Rotor 2 wirkende Drehmoment M wiederum führt zu einer Winkelbeschleunigung α des Rotors 2, die unter vereinfachenden Annahmen wie ein konstantes Eigen- und Lastträgheitsmoment und die
 20 Abwesenheit von Stör- und Reibmomenten proportional zum Drehmoment M ist. Bezeichnet man die Summe von Eigen- und Lastträgheitsmoment mit J , so gilt

$$\alpha = M / J. \quad (40)$$

Erfindungsgemäß wird nun der Motor 1 so bestromt, dass man durch Vergleich von Motorbestromung i_R , i_S , i_T und resultierender Winkelbeschleunigung α auf die Rotorlage θ schließen kann. Eine geeignete Verrechnung der mit dem Beschleunigungssensor 6 gemessenen Winkelbeschleunigung α mit der Motorbestromung i_R , i_S , i_T mittels der Auswerteeinheit 8 führt dann
 30 zur Winkellage θ des Rotors 2.

Im Folgenden werden die Zusammenhänge zwischen den oben erwähnten Größen i_R , i_S , i_T , θ und das erfindungsgemäße Verfahren
 35 näher erläutert:

Aufgrund des die den Motorströme i_R , i_S , i_T verbindenden Knotens 9 gilt

$$i_R + i_S + i_T = 0 \quad (50)$$

5 Daher lassen sich die Motorströme i_R , i_S , i_T auch durch zwei orthogonale Komponenten

$$i_\alpha = (2/3) i_R + (-1/3) i_S + (-1/3) i_T \quad (60a)$$

$$i_\beta = i_R + (1/3^{1/2}) i_S + (-1/3^{1/2}) i_T \quad (60b)$$

darstellen; stellt man umgekehrt die Motorströme i_R , i_S , i_T durch die orthogonalen Komponenten i_α , i_β dar, so erhält man

$$10 \quad i_R = i_\alpha \quad (70a)$$

$$i_S = (-1/2) i_\alpha + (3^{1/2}/2) i_\beta \quad (70b)$$

$$i_T = (-1/2) i_\alpha + (-3^{1/2}/2) i_\beta \quad (70c)$$

Diese Komponenten des Stroms werden als statorfest bezeichnet. Durch Drehung der orthogonalen Komponenten i_α , i_β um einen Winkel θ_x ergeben sich die Komponenten

$$i_x(\theta_x) = (\cos \theta_x) i_\alpha + (\sin \theta_x) i_\beta \quad (80a)$$

$$i_y(\theta_x) = (-\sin \theta_x) i_\alpha + (\cos \theta_x) i_\beta \quad (80b)$$

Bei einem konstanten Winkel θ_x sind diese Komponenten i_x , i_y ebenfalls statorfest. Setzt man den Winkel θ_x dagegen gleich der im Allgemeinen zeitveränderlichen Rotorlage θ , so kommt man zu den rotorfesten Koordinaten

$$i_q = i_x(\theta) = (\cos \theta) i_\alpha + (\sin \theta) i_\beta \quad (90a)$$

$$i_d = i_y(\theta) = (-\sin \theta) i_\alpha + (\cos \theta) i_\beta \quad (90b)$$

25 In Fig. 2 ist die Beziehung zwischen den für die Darstellung der Motorbestromung verwendeten Koordinaten $\alpha, \beta, x, y, q, d$ veranschaulicht, wobei der Rotor 2 des Motors 1 als Stabmagnet symbolisiert ist und ω die Winkelgeschwindigkeit bezeichnet.

30 Mit den rotorfesten Koordinaten i_q , i_d lässt sich der Zusammenhang zwischen Motorbestromung und erzeugtem Drehmoment M bzw. Winkelbeschleunigung α sehr einfach formulieren: Das Drehmoment M ist einfach proportional zur Komponente i_q =

$i_x(\theta)$, während $i_d = i_y(\theta)$ kein Drehmoment erzeugt. Mit der Gleichung (40) folgt daraus für das Drehmoment M und die Winkelbeschleunigung α des Rotors 2

$$M = K_M i_q \quad ; \quad \alpha = (K_M / J) i_q \quad (100)$$

5 wobei

$$K_M > 0 \quad (105)$$

eine Proportionalitätskonstante bezeichnet.

Da die rotorfeste Komponente i_d der Bestromung kein Drehmoment M erzeugt, sollte versucht werden, den Motor 1 so zu bestromen, dass $i_d = 0$ wird. Hierfür, allgemein für eine Bestromung mit definierten rotorfesten Koordinaten i_q, i_d , muss die Rotorlage θ bekannt sein. Zur Bestimmung der Rotorlage θ erfolgt eine Bestromung der Statorwicklungen 7 des Motors 1 mit definierten Pulsmustern PM1, PM2 oder PM3, welche jeweils ein Bestromungsmuster BM_{1x} , BM_{1y} , BM_{2x} , BM_{2y} , BM_{3x} , BM_{3y} in jeder der Komponenten i_x , i_y aufweisen, wie anhand der folgenden Beispiele näher erläutert wird. Nach einem Grundprinzip zur der Bestimmung der Rotorlage θ wird der Motor 1 für ein kurzes
20 Zeitintervall

$$t_0 \leq t < t_0 + T_1$$

mit

$$i_x(\theta_x) = I_0, \quad i_y(\theta_x) = 0 \quad (120)$$

bestromt, wobei T_1 so klein sei, dass sich die Rotorlage θ in dieser Zeitspanne praktisch nicht verändert. Durch Auflösen von (80a,b) nach i_α , i_β und Einsetzen des Ergebnisses in (90a,b) erhält man

$$i_q = [\cos(\theta - \theta_x)] i_x(\theta_x) + [\sin(\theta - \theta_x)] i_y(\theta_x) \quad (130a)$$

$$i_d = [-\sin(\theta - \theta_x)] i_x(\theta_x) + [\cos(\theta - \theta_x)] i_y(\theta_x) \quad (130b)$$

30

Mit (120) und (100) folgt daraus

$$\alpha = [\cos(\theta - \theta_x)] (K_M / J) I_0 \quad (140)$$

Durch Auflösen nach dem Winkel erhält man hieraus zunächst

$$\theta - \theta_x = \pm \operatorname{Arccos} (\alpha J / (K_M I_0)) + 2 k \pi \quad (150)$$

bzw.

$$\theta = \operatorname{mod} (\theta_x \pm \operatorname{Arccos} (\alpha J / (K_M I_0)), 2 \pi), \quad (160)$$

wobei Arccos den Hauptwert des Arcuscosinus, k eine ganze Zahl
 5 und mod die Modulo-Funktion bezeichnet, d.h. $\operatorname{mod}(x, y)$ ist der Rest bei der Division von x durch y . Die Bestimmung der Rotorlage θ nach (160) hat dabei noch zwei Nachteile:

Zum einen muss das Verhältnis zwischen der Proportionalitätskonstante K_M und der mit J bezeichneten Summe von Eigen- und
 10 Lastträgheitsmomenten des Rotors 2 bekannt sein.

Zum anderen kann das Vorzeichen der Differenz zwischen den Winkeln θ und θ_x , das heißt die Differenz zwischen der tatsächlichen Winkellage des Rotors 2 und derjenigen Winkellage des Rotors 2, bei der mit der gegebenen Bestromung das maximale
 15 Drehmoment M auf den Rotor 2 wirken würde, nicht bestimmt werden.

Diese Nachteile werden durch die im folgenden beschriebenen Verfahren behoben.

20

Zur Bestimmung der Rotorlage θ im Stillstand des Rotors 2 zum Zeitpunkt $t = 0$ wird der Motor 1 entsprechend Fig. 3 mit einem Pulsmuster PM1 bestromt, welches sich aus einem Bestromungsmuster BM_{1x} der Komponente i_x und einem Bestromungsmuster BM_{1y}
 25 der Komponente i_y zusammensetzt:

$$\begin{aligned} i_x(\theta_x, t) &= I_{x0} && \text{für} && 0 \leq t < T_1 \\ &= -I_{x0} && \text{für} && T_1 \leq t < 3 T_1 \\ &= I_{x0} && \text{für} && 3 T_1 \leq t < 4 T_1 \\ &= 0 && \text{sonst} && \end{aligned} \quad (162a)$$

$$\begin{aligned} 30 \quad i_y(\theta_x, t) &= I_{y0} && \text{für} && 4 T_1 + T_2 \leq t < 5 T_1 + T_2 \\ &= -I_{y0} && \text{für} && 5 T_1 + T_2 \leq t < 7 T_1 + T_2 \\ &= I_{y0} && \text{für} && 7 T_1 + T_2 \leq t < 8 T_1 + T_2 \\ &= 0 && \text{sonst} && \end{aligned} \quad (162b)$$

Dabei sind

$$T_1 K_M I_{x0} / J \text{ und } T_1 K_M I_{y0} / J \text{ hinreichend klein,} \quad (163a)$$

so dass sich während der Bestromungsphasen

$$0 \leq t < 4 T_1 \quad (i_x(\theta_x, t) \neq 0) \quad , \quad (163b)$$

$$5 \quad 4 T_1 + T_2 \leq t < 8 T_1 + T_2 \quad (i_y(\theta_x, t) \neq 0) \quad , \quad (163c)$$

die Rotorlage θ nur unwesentlich ändert und damit die Winkelbeschleunigung α jeweils proportional zum Strom $i_x(\theta_x, t)$ bzw. $i_y(\theta_x, t)$ ist. Damit ist die Bestromung (162a,b) so gewählt, dass sich die aus der Beschleunigung durch zweifache Integration ergebende Rotorlage durch diese Bestromung nur vorübergehend während der Bestromungsphasen ändert, ansonsten aber unverändert bleibt, d.h.

$$\theta(t) = \theta(0) \text{ für } 4 T_1 \leq t \leq 4 T_1 + T_2 \quad , \quad (164a)$$

$$\theta(t) = \theta(0) \text{ für } 8 T_1 + T_2 \leq t \quad (164b)$$

15 Die Pulsdauer T des Pulsmusters PM1 ist durch $8 T_1 + T_2$ gegeben. Der Zeitabschnitt jeder Komponente $i_x(\theta_x, t)$, $i_y(\theta_x, t)$, in welchem das jeweilige Signal von Null verschieden ist, wird als Bestromungsphase, die übrige Zeit als bestromungsfreie Phase bezeichnet. Wie aus Fig. 3 sowie den Gleichungen
20 (162a,b) hervorgeht, fällt die Bestromungsphase einer der Komponenten i_x , i_y jeweils in eine bestromungsfreie Phase der anderen Komponenten i_y , i_x .

Insgesamt resultiert damit aus der Bestromung (162a,b) gemäß
25 (130a,b), (100) die Winkelbeschleunigung

$$\begin{aligned} \alpha(t) &= (K_M I_{x0} / J) \cos(\theta - \theta_x) \quad \text{für } 0 \leq t < T_1 \\ &= - (K_M I_{x0} / J) \cos(\theta - \theta_x) \quad \text{für } T_1 \leq t < 3 T_1 \\ &= (K_M I_{x0} / J) \cos(\theta - \theta_x) \quad \text{für } 3 T_1 \leq t < 4 T_1 \\ &= (K_M I_{y0} / J) \sin(\theta - \theta_x) \quad \text{für } 4 T_1 + T_2 \leq t < 5 T_1 + T_2 \\ 30 \quad &= - (K_M I_{y0} / J) \sin(\theta - \theta_x) \quad \text{für } 5 T_1 + T_2 \leq t < 7 T_1 + T_2 \\ &= (K_M I_{y0} / J) \sin(\theta - \theta_x) \quad \text{für } 7 T_1 + T_2 \leq t < 8 T_1 + T_2 \\ &= 0 \quad \text{sonst} \quad (165) \end{aligned}$$

Daraus ergeben sich zunächst die Beziehungen

$$\begin{aligned}\cos (\theta - \theta_x) &= (J / K_M) \alpha(t_x) / I_{x0} , \\ \sin (\theta - \theta_x) &= (J / K_M) \alpha(t_y) / I_{y0} ,\end{aligned}\quad (166a)$$

dabei bedeuten t_x, t_y beliebige Zeitpunkte im Bereich

$$5 \quad 0 \leq t_x \leq T_1 \quad \text{oder} \quad 3 T_1 \leq t_x \leq 4 T_1 \quad \text{bzw.} \quad (166b)$$

$$4 T_1 + T_2 \leq t_y \leq 5 T_1 + T_2 \quad \text{oder}$$

$$7 T_1 + T_2 \leq t_y \leq 8 T_1 + T_2 \quad (166c)$$

Damit lässt sich die gesuchte Rotorlage $\theta(0)$ wegen (105) bereits wie folgt bestimmen:

$$10 \quad \theta(0) = \theta_x + \text{atan2}(\alpha(t_y)/I_{y0}, \alpha(t_x)/I_{x0}) \quad ; \quad (166d)$$

dabei bedeutet $\text{atan2}(y, x)$ das Argument der komplexen Zahl $x + j y$, wobei j die imaginäre Einheit ($j^2 = -1$) bezeichnet. Für die praktische Anwendung dieser Formel ist jedoch zu berücksichtigen, dass bei der Bestromung die Zusammenhänge nach
 15 (165) meist nur näherungsweise im zeitlichen Mittel gelten. Besser geeignet ist hier die Bestimmung der Rotorlage θ nach der Formel

$$\theta(0) = \theta_x + \text{atan2}(C_{\alpha iy} / C_{iy iy}, C_{\alpha ix} / C_{ix ix}) ; \quad (167a)$$

mit

$$20 \quad C_{\alpha ix} = \int_{0 \leq t \leq T} \alpha(t) i_x(\theta_x, t) dt ,$$

$$C_{\alpha iy} = \int_{0 \leq t \leq T} \alpha(t) i_y(\theta_x, t) dt , \quad (167b, c)$$

$$C_{ixix} = \int_{0 \leq t \leq T} [i_x(\theta_x, t)]^2 dt ,$$

$$C_{iyiy} = \int_{0 \leq t \leq T} [i_y(\theta_x, t)]^2 dt . \quad (167d, e)$$

mit

$$25 \quad T = 8 T_1 + 2 T_2 \quad (168)$$

Auf verschiedene Arten kann die Rotorlage θ nicht nur zu Beginn, beim Anfahren des Motors 1, sondern fortlaufend während des Betriebs bestimmt werden. Allgemein muss hierzu der zum
 30 eigentlichen Betrieb benötigten Bestromung

$$i_{x \text{ soll}}(\theta_x, t), i_{y \text{ soll}}(\theta_x, t) \quad (169a)$$

noch eine Testbestromung

$$i_{x \text{ test}}(\theta_x, t), i_{y \text{ test}}(\theta_x, t) \quad (169b)$$

überlagert werden, d.h. es muss mit

$$i_x(\theta_x, t) = i_{x \text{ soll}}(\theta_x, t) + i_{x \text{ test}}(\theta_x, t) \quad , \quad (169c)$$

$$5 \quad i_y(\theta_y, t) = i_{y \text{ soll}}(\theta_x, t) + i_{y \text{ test}}(\theta_x, t) \quad , \quad (169d)$$

bestromt werden. Für diese hier als Testbestromung $i_{x \text{ test}}(\theta_x, t)$, $i_{y \text{ test}}(\theta_x, t)$ bezeichneten Pulsmuster PM gibt es mehrere Möglichkeiten:

10 Eine erste Möglichkeit einer geeigneten Testbestromung ergibt sich z.B. aus der periodischen Fortsetzung von (162a,b) für $t > 0$, wie das in Fig. 4 dargestellte, sich aus Bestromungsmustern BM_{2x}, BM_{2y} zusammensetzende Pulsmuster PM2 zeigt:

$$\begin{aligned} i_{x \text{ test}}(\theta_x, t) &= I_{x0} && \text{für} && n T \leq t < n T + T_1 \\ &= -I_{x0} && \text{für} && n T + T_1 \leq t < n T + 3 T_1 \\ 15 & && && \\ &= I_{x0} && \text{für} && n T + 3 T_1 \leq t < n T + 4 T_1 \\ &= 0 && \text{sonst} && \end{aligned} \quad (170a)$$

$$\begin{aligned} i_{y \text{ test}}(\theta_x, t) &= I_{y0} && \text{für} && n T + 4 T_1 \leq t < n T + 5 T_1 \\ &= -I_{y0} && \text{für} && n T + 5 T_1 \leq t < n T + 7 T_1 \\ &= I_{y0} && \text{für} && n T + 7 T_1 \leq t < n T + 8 T_1 \\ 20 & && && \\ &= 0 && \text{sonst,} && \end{aligned} \quad (170b)$$

$$n = 0, 1, 2, \dots \quad (170c)$$

mit T nach (168).

25 Setzt man voraus, dass sich die Rotorlage θ innerhalb der Zeitintervalle $nT \leq t \leq (n+1)T$; $n = 0, 1, 2, \dots$ nur unwesentlich ändert, so resultiert gemäß (90a,b), (100) daraus eine zusätzliche Beschleunigung

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{test}}(t) &:= \alpha(t) - \alpha_{\text{soll}}(t) = (K_M I_{x0} / J) \cos(\theta - \theta_x) \\ &\text{für} && n T \leq t < n T + T_1 \\ 30 & && \\ &= - (K_M I_{x0} / J) \cos(\theta - \theta_x) \\ &\text{für} && n T + T_1 \leq t < n T + 3 T_1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= (K_M I_{x0} / J) \cos (\theta - \theta_x) \\
\text{für} \quad &n T + 3 T_1 \leq t < n T + 4 T_1 \\
&= (K_M I_{y0} / J) \sin (\theta - \theta_x) \\
\text{für} \quad &n T + 4 T_1 \leq t < n T + 5 T_1 \\
5 \quad &= - (K_M I_{y0} / J) \sin (\theta - \theta_x) \\
\text{für} \quad &n T + 5 T_1 \leq t < n T + 7 T_1 \\
&= (K_M I_{y0} / J) \sin (\theta - \theta_x) \\
\text{für} \quad &n T + 7 T_1 \leq t < n T + 8 T_1 \\
&= 0 \quad \text{sonst,} \quad (180)
\end{aligned}$$

10 wobei $\alpha_{\text{soll}}(t)$ die auf Grund der zum eigentlichen Betrieb benötigten Bestromung

$$i_{x \text{ soll}}(\theta_x, t), i_{y \text{ soll}}(\theta_x, t)$$

erwartete Beschleunigung darstellt und damit als bekannt vorausgesetzt werden darf.

15

Damit ergibt sich aus (180) zunächst

$$\begin{aligned}
\cos (\theta - \theta_x) &= (J / K_M) \alpha_{\text{test}}(t_x) / I_{x0}, \quad \sin (\theta - \theta_x) = \\
&(J / K_M) \alpha_{\text{test}}(t_y) / I_{y0} \quad ; \quad (190a)
\end{aligned}$$

dabei bedeuten t_x, t_y beliebige Zeitpunkte im Bereich

$$\begin{aligned}
20 \quad n T \leq t_x \leq n T + T_1 \quad \text{oder} \quad n T + 3 T_1 \leq t_x \leq n T + 4 T_1 \\
\text{bzw.} \quad (190b)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
n T + 4 T_1 + T_2 \leq t_y \leq n T + 5 T_1 + T_2 \quad \text{oder} \\
n T + 7 T_1 + T_2 \leq t_y \leq n T + 8 T_1 + T_2 \quad (190c)
\end{aligned}$$

Damit lässt sich damit $\theta(n T)$ bereits wie folgt bestimmen:

$$\begin{aligned}
25 \quad \theta(n T) &= \theta_x + \text{atan2}([\alpha(t_y) - \alpha_{\text{soll}}(t_y)] / I_{y0}, \\
&[\alpha(t_x) - \alpha_{\text{soll}}(t_x)] / I_{x0}) \quad (190d)
\end{aligned}$$

Für die praktische Anwendung dieser Formel ist jedoch zu berücksichtigen, dass bei der Bestromung die Zusammenhänge nach

30 (180) meist nur näherungsweise im zeitlichen Mittel gelten.

Besser geeignet ist hier die Bestimmung der Rotorlage θ im Zeitintervall $n T \leq t \leq (n+1) T$ nach der Formel

$$\theta(n T) = \theta_x + \text{atan2}(c_{\alpha i_y} / c_{i_y i_y}, c_{\alpha i_x} / c_{i_x i_x}) ; \quad (200a)$$

mit

$$\begin{aligned} 5 \quad c_{\alpha i_x} &= \int_{n T \leq t \leq (n+1) T} [\alpha(t) - \alpha_{\text{soll}}(t)] i_{x \text{ test}}(\theta_x, t) dt, \\ c_{\alpha i_y} &= \int_{n T \leq t \leq (n+1) T} [\alpha(t) - \alpha_{\text{soll}}(t)] i_{y \text{ test}}(\theta_x, t) dt, \quad (200b, c) \\ c_{i_x i_x} &= \int_{n T \leq t \leq (n+1) T} [i_{x \text{ test}}(\theta_x, t)]^2 dt, \\ c_{i_y i_y} &= \int_{n T \leq t \leq (n+1) T} [i_{y \text{ test}}(\theta_x, t)]^2 dt. \quad (200d, e) \end{aligned}$$

Bisher wurde vorausgesetzt bzw. mit der Näherung gearbeitet,
10 dass sich die Rotorlage θ innerhalb der Zeitintervalle $n T \leq t \leq (n+1) T = 0$ nur unwesentlich ändert. Auf diese Voraussetzung kann verzichtet werden, wenn man zum Beispiel den eigentlich gewünschten Bewegungsverlauf

$$\theta_{\text{soll}}(t)$$

15 mit berücksichtigt. Überlagert man damit an Stelle von (170a-c) die modifizierte Bestromung

$$i_{x \text{ test}}(\theta_x + \theta_{\text{soll}}(t) - \theta_{\text{soll}}(n T), t) = I_{x0}$$

$$\text{für} \quad n T \leq t < n T + T_1$$

$$= -I_{x0}$$

$$20 \quad \text{für} \quad n T + T_1 \leq t < n T + 3 T_1$$

$$= I_{x0}$$

$$\text{für} \quad n T + 3 T_1 \leq t < n T + 4 T_1$$

$$= 0 \quad \text{sonst} \quad (220a)$$

$$i_{y \text{ test}}(\theta_x + \theta_{\text{soll}}(t) - \theta_{\text{soll}}(n T), t) = I_{y0}$$

$$25 \quad \text{für} \quad n T + 4 T_1 \leq t < n T + 5 T_1$$

$$= -I_{y0}$$

$$\text{für} \quad n T + 5 T_1 \leq t < n T + 7 T_1$$

$$= I_{y0}$$

$$\text{für} \quad n T + 7 T_1 \leq t < n T + 8 T_1$$

$$30 \quad = 0 \quad \text{sonst} \quad (220b)$$

$$n = 0, 1, 2, \dots \quad (220c)$$

mit T nach (168), so gelten dafür (190d) und (200a-e) genauso.

An Stelle des gewünschten Bewegungsverlaufes kann man für

- 5 $\theta_{soll}(t)$ auch einen geschätzten Lageverlauf des Rotors 2 einsetzen. Gute Möglichkeiten der Schätzung des Lageverlaufs sind beispielsweise in der DE 44 39 233 A1 sowie in der DE 100 24 394 A1 beschrieben.

- 10 Eine weitere Möglichkeit einer geeigneten Testbestromung, das heißt eines Bestromungsmuster BM_{3x} , BM_{3y} aufweisenden Puls-musters PM3, wird im Folgenden unter Bezugnahme auf Fig. 5 beschrieben: An Stelle der Bestromung gemäß (170a-c) und Fig. 4 bzw. (220a-c) wird der Motor 1 hierbei wie folgt bestromt, wo-
- 15 bei I_{x0} und I_{y0} als Maximalströme bezeichnet sind:

$$\begin{aligned} i_{x \text{ test}}(\theta_x, t) &= I_{x0} && \text{für} && n T \leq t < n T + T/8 \\ &= -I_{x0} && \text{für} && n T + T/8 \leq t < n T + 3T/8 \\ &= I_{x0} && \text{für} && n T + 3T/8 \leq t < n T + 5T/8 \\ &= -I_{x0} && \text{für} && n T + 5T/8 \leq t < n T + 7T/8 \\ 20 &= I_{x0} && \text{für} && n T + 7T/8 \leq t < n T + T \\ &= 0 && \text{sonst} && \end{aligned} \quad (240a)$$

$$\begin{aligned} i_{y \text{ test}}(\theta_y, t) &= I_{y0} && \text{für} && n T \leq t < n T + T/4 \\ &= -I_{y0} && \text{für} && n T + T/4 \leq t < n T + 3T/4 \\ &= I_{y0} && \text{für} && n T + 3T/4 \leq t < n T + T \\ 25 &= 0 && \text{sonst} && , \end{aligned} \quad (240b)$$

$$n = 0, 1, 2, \dots \quad (240c)$$

bzw.

$$\begin{aligned} i_{x \text{ test}}(\theta_x + \theta_{soll}(t) - \theta_{soll}(n T), t) &= I_{x0} \\ \text{für} &&& n T \leq t < n T + T/8 \\ 30 &&& = -I_{x0} \\ \text{für} &&& n T + T/8 \leq t < n T + 3T/8 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= I_{x0} \\
 \text{für} \quad &n T + 3T/8 \leq t < n T + 5T/8 \\
 &= -I_{x0} \\
 \text{für} \quad &n T + 5T/8 \leq t < n T + 7T/8 \\
 5 \quad &= I_{x0} \\
 \text{für} \quad &n T + 7T/8 \leq t < n T + T \\
 &= 0 \quad \text{sonst} \quad (245a) \\
 i_{y \text{ test}}(\theta_x + \theta_{soll}(t) - \theta_{soll}(n T), t) &= I_{y0} \\
 \text{für} \quad &n T \leq t < n T + T/4 \\
 10 \quad &= -I_{y0} \\
 \text{für} \quad &n T + T/4 \leq t < n T + 3T/4 \\
 &= I_{y0} \\
 \text{für} \quad &n T + 3T/4 \leq t < n T + T \\
 &= 0 \quad \text{sonst} \quad , \quad (245b) \\
 15 \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (245c)
 \end{aligned}$$

Auch hier bezeichnet $\theta_{soll}(t)$ den gewünschten Bewegungsverlauf oder einen geschätzten Lageverlauf des Rotors 2. In diesem Zusammenhang wird ebenfalls auf die DE 44 39 233 A1 sowie die DE 100 24 394 A1 verwiesen.

20 Eine Berechnung der Rotorlage nach (190d) ist hier nicht mehr möglich, wohl aber nach (200a-e). Dabei muss T so gewählt werden, dass die Frequenz $2 / T$ gegenüber einer etwaigen Grenzfrequenz (vgl. DE 44 39 233 A1, Seite 7, Zeilen 39-51) des Beschleunigungsmesssystems vernachlässigt werden kann.

25

Abweichend von der vorgenannten Ausführungsbeispielen lassen sich im Sinne eines Frequenzmultiplex an Stelle eines rechteckförmigen Stromverlaufs gemäß (240a-c) und Fig. 5 bzw. 30 (245a-c) auch sinusförmige Stromverläufe anwenden:

$$i_{x \text{ test}}(\theta_x, t) = I_{x0} \cos(2 \pi f_x t) \quad \text{für} \quad t > 0 \quad (250a)$$

$$i_{y \text{ test}}(\theta_y, t) = I_{y0} \cos(2 \pi f_y t) \quad \text{für} \quad t > 0 \quad (250b)$$

bzw.

$$i_{x \text{ test}}(\theta_x + \theta_{\text{sol1}}(t), t) = I_{x0} \cos(2 \pi f_x t) \text{ für } t > 0 \quad (260a)$$

$$i_{y \text{ test}}(\theta_x + \theta_{\text{sol1}}(t), t) = I_{y0} \cos(2 \pi f_y t) \text{ für } t > 0 \quad (260b)$$

Dabei sei vorausgesetzt, dass sich der gewünschte Bewegungs-
 5 verlauf $\theta_{\text{sol1}}(t)$ im Vergleich zu den Kosinusfunktionen $\cos(2 \pi f_x t)$, $\cos(2 \pi f_y t)$ zeitlich nur langsam ändert.

Die Bestimmung der Rotorlage θ erfolgt dann allerdings nicht
 mehr nach (200a-e), sondern über die Anwendung einschlägiger
 Demodulationsverfahren auf das gemessene Beschleunigungssig-
 10 nal. Solche Demodulationsverfahren sind z.B. aus der Nachricht-
 tenteknik bekannt. Durch sie erhält man die Signale

$$A_x(t), A_y(t), \quad (270)$$

die sich im Vergleich zu $\cos(2 \pi f_x t)$, $\cos(2 \pi f_y t)$ zeitlich
 nur langsam ändern und für die näherungsweise

$$15 \quad \alpha(t) = A_x(t) \cos(2 \pi f_x t) + A_y(t) \cos(2 \pi f_y t) \quad (280)$$

gilt. Aus diesen Signalen erhält man den gesuchten Verlauf der
 Rotorlage θ zu

$$\theta(t) = \theta_x + \text{atan2}(A_y(t)/I_{y0}, A_x(t)/I_{x0}) \quad (290)$$

bzw.

$$20 \quad \theta(t) = \theta_x + \theta_{\text{sol1}}(x) + \text{atan2}(A_y(t)/I_{y0}, A_x(t)/I_{x0}) \quad (300)$$

Wenn dabei die Frequenzen f_x , f_y gegenüber einer etwaigen
 Grenzfrequenz (vgl. DE 44 39 233 A1, Seite 7, Zeilen 39-51)
 des Beschleunigungsmesssystems nicht mehr vernachlässigbar
 sind, muss obiges Verfahren modifiziert werden, wie im folgen-
 25 den ausgeführt wird:

In diesem Fall ist das Ausgangssignal $U_\alpha(t)$ nicht direkt pro-
 portional zu $\alpha(t)$, vielmehr ergibt sich

$$30 \quad U_\alpha(t) = U_x(t) \cos(2 \pi f_x t + \varphi_x) + U_y(t) \cos(2 \pi f_y t + \varphi_y) \quad (310a)$$

mit

$$U_x(t) = A_x(t) |H(j 2 \pi f_x)|, \quad \varphi_x = \arg(H(j 2 \pi f_x)),$$

(310b,c)

$$U_y(t) = A_y(t) |H(j 2 \pi f_y)|, \quad \varphi_y = \arg(H(j 2 \pi f_y)),$$

(310d,e)

5 wobei H die Übertragungsfunktion des Beschleunigungssmesssystems und $\arg(z)$ das Argument der komplexen Zahl z bezeichnet. Folglich kann man die Signale $A_x(t)$, $A_y(t)$ gemäß

$$A_x(t) = U_x(t) / |H(j 2 \pi f_x)|, \quad A_y(t) = U_y(t) / |H(j 2 \pi f_y)|$$

(320a,b)

10 bestimmen und damit die Rotorlage nach (290) bzw. (300) berechnen.

Die bisher beschriebene Bestromung des Motors 1 führt im allgemeinen gemäß (180) zu einer zusätzlichen "vibrationsartigen"

15 Drehbewegung, die der eigentlich gewünschten Drehbewegung des Rotors 2 überlagert ist. Bei hinreichend kleinen I_{x0} , I_{y0} ist dies nicht nachteilig. Eine weitere Reduzierung dieser zusätzlichen überlagerten Drehbewegung, das heißt Testbewegung, ist in vorteilhafter Weise dadurch erreichbar, dass man

$$20 \quad I_{x0} = 0 \quad (330a)$$

wählt und versucht,

$$\theta_x = \theta \quad (330b)$$

anzunähern. In diesem Fall kann die Rotorlage θ allerdings nicht mehr nach (190d) oder (200a-e) (für Pulsmuster PM2 oder

25 PM3) bzw. (290) oder (300) (für "Frequenzmultiplex" gemäß (250a,b) bzw. (260a,b)) bestimmt werden, weil man dabei unbestimmte Ausdrücke der Art 0/0 auswerten müsste. Man kann in diesem Fall aber θ_x mit einem Regelkreises so nachführen, dass man die Größe $c_{\alpha i y}$ nach (200c) (für Pulsmuster PM2 oder PM3)

30 bzw. das Signal $A_y(t)$ nach (280) oder $U_y(t)$ nach (310a) (für "Frequenzmultiplex" gemäß (250a,b) bzw. (260a,b)) zu Null regelt. Die Rotorlage θ erhält man dann aus (330b).

Das erfindungsgemäße Verfahren, das vorstehend für rotatorische Elektromotoren beschrieben wurde, ist analog auch bei Li-

35

nearmotoren anwendbar. Auch in diesem Fall ermöglicht das Verfahren insbesondere beim Anfahrvorgang eine Bestimmung der Lage des beweglichen Teils des Motors ohne absolute sowie ohne inkrementale Ortsmessung.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Bestimmung der Winkellage (θ) eines eine Polpaarzahl aufweisenden Rotors (2) eines Elektromotors (1), mit folgenden Schritten:
 - Bestromung mindestens einer Statorwicklung (7) des Elektromotors (1) mit einem Pulsmuster (PM1, PM2, PM3) einer Pulsdauer (T) derart, dass der Rotor (2) während der Pulsdauer (T) um nicht mehr als 90° geteilt durch die Polpaarzahl rotiert,
 - Erfassung der durch die Bestromung der mindestens einen Statorwicklung (7) bewirkten Winkelbeschleunigung (α) des Rotors (2),
 - Ermittlung der Winkellage (θ) des Rotors (2) mittels des Zusammenhangs zwischen der Bestromung der Statorwicklung (7) und der Winkelbeschleunigung (α) des Rotors (2).
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Messung der Winkelbeschleunigung (α) des Rotors (2) durch Erzeugung einer physikalisch von der Winkelbeschleunigung (α) abhängigen Messgröße, ohne inkrementale Ortsbestimmung sowie ohne Geschwindigkeitsmessung, erfolgt.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Bestromung der Statorwicklungen (7) durch linear voneinander unabhängige, jeweils ein Bestromungsmuster ($BM_{1x}, BM_{1y}, BM_{2x}, BM_{2y}, BM_{3x}, BM_{3y}$) aufweisende Komponenten (i_x, i_y) erfolgt.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass der Rotor (2) während der Pulsdauer (T) um nicht mehr als 2° rotiert.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4,
dadurch gekennzeichnet, dass der
Rotor (2) zu Beginn der Bestimmung dessen Winkellage (θ)
in Ruhe ist.
- 5 6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4,
dadurch gekennzeichnet, dass der
Rotor (2) bereits zu Beginn der Bestimmung dessen Winkel-
lage (θ) rotiert.
- 10 7. Verfahren nach einem der Ansprüche 3 bis 6,
dadurch gekennzeichnet, dass die
Komponenten (i_x, i_y) des Pulsmusters (PM1, PM2, PM3) inner-
halb der Pulsdauer (T) zeitlich versetzte Bestromungsmus-
15 ter ($BM_{1x}, BM_{1y}, BM_{2x}, BM_{2y}, BM_{3x}, BM_{3y}$) aufweisen.
8. Verfahren nach Anspruch 7,
dadurch gekennzeichnet, dass die
Bestromung der Statorwicklungen (7) durch zwei zueinander
20 orthogonale Komponenten (i_x, i_y) erfolgt.
9. Verfahren nach Anspruch 7 oder 8,
dadurch gekennzeichnet, dass die
Bestromungsmuster ($BM_{1x}, BM_{1y}, BM_{2x}, BM_{2y}, BM_{3x}, BM_{3y}$) der ver-
25 schiedenen Komponenten (i_x, i_y) gleichartig sind.
10. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 bis 9,
dadurch gekennzeichnet, dass ein
Bestromungsmuster ($BM_{1x}, BM_{1y}, BM_{2x}, BM_{2y}, BM_{3x}, BM_{3y}$) eine Bestro-
30 mungsphase, innerhalb welcher die Komponente (i_x, i_y) von
Null verschieden ist, sowie eine bestromungsfreie Phase
aufweist.
11. Verfahren nach Anspruch 10,
35 dadurch gekennzeichnet, dass eine
Bestromungsphase einer der Komponenten (i_x, i_y) des Puls-
musters (PM1, PM2, PM3) innerhalb einer bestromungsfreien

Phase einer anderen Komponente (i_y, i_x) desselben Pulsmusters (PM1, PM2, PM3) liegt.

12. Verfahren nach einem der Ansprüche 3 bis 6,
5 d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass beide
Komponenten (i_x, i_y) des Pulsmusters (PM1, PM2, PM3) synchron
verlaufen, jedoch unterschiedliche Bestromungsmuster
($BM_{1x}, BM_{1y}, BM_{2x}, BM_{2y}, BM_{3x}, BM_{3y}$) aufweisen.
- 10 13. Verfahren nach einem der Ansprüche 3 bis 12,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass ein
Bestromungsmuster ($BM_{1x}, BM_{1y}, BM_{2x}, BM_{2y}, BM_{3x}, BM_{3y}$) Abschnitte
unterschiedlichen Vorzeichens der Komponente (i_x, i_y)
15 derart aufweist, dass damit keine bleibende Veränderung
der Winkellage (θ) des Rotors (2) bewirkt wird.
14. Verfahren nach Anspruch 13,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass sich
innerhalb eines Bestromungsmuster ($BM_{1x}, BM_{1y}, BM_{2x}, BM_{2y},$
20 BM_{3x}, BM_{3y}) zeitlich vor und nach einem zentralen Abschnitt,
in welchem die Komponente (i_x, i_y) ein erstes Vorzeichen
aufweist, jeweils ein Randabschnitt anschließt, in welchem
die Komponente (i_x, i_y) das entgegengesetzte Vorzeichen
aufweist.
- 25 15. Verfahren nach Anspruch 14,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass der
Betrag des Maximalstroms ($+I_{x0}, +I_{y0}$) der Komponente (i_x, i_y)
im zentralen Abschnitt dem Betrag des Maximalstrom im
30 Randabschnitt entspricht.
16. Verfahren nach Anspruch 15,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass die
Randabschnitte jeweils die selbe zeitliche Dauer (T_1) ha-
35 ben und diese Dauer jeweils die Hälfte der Dauer ($2 T_1$)
des zentralen Abschnitts beträgt.

17. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 16,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass sich
das Pulsmuster (PM1,PM2,PM3) periodisch wiederholt.
- 5 18. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 17,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass das
Pulsmuster (PM1,PM2,PM3) einen Rechteckimpuls umfasst.
- 10 19. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 17,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t,
dass das Pulsmuster (PM1,PM2,PM3) einen sinusförmigen
Stromverlauf aufweist.
- 15 20. Vorrichtung zur Bestimmung der Winkellage eines eine Pol-
paarzahl aufweisenden Rotors (2) eines Elektromotors (1),
mit
- Statorwicklungen (7), welche zur Beaufschlagung mit einem
Pulsmuster (PM1,PM2,PM3) einer Pulsdauer (T) vorgesehen
sind,
 - 20 • einem zur Erfassung der durch die Bestromung der Stator-
wicklungen (7) bewirkten Winkelbeschleunigung (α) des Ro-
tors (2) vorgesehenen Beschleunigungssensor (6),
 - einer mit den Statorwicklungen (7) sowie mit dem Be-
schleunigungssensor (6) zusammenwirkenden Auswerteeinheit
 - 25 (8),
zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der Ansprüche
bis 18.
- 30 21. Vorrichtung nach Anspruch 19,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass als
Beschleunigungssensor (6) ein Ferraris-Sensor vorgesehen
ist.
- 35 22. Vorrichtung nach Anspruch 19 oder 20,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass der
Rotor (2) als Permanentmagnet-Rotor ausgebildet ist.

1/5

FIG 1a

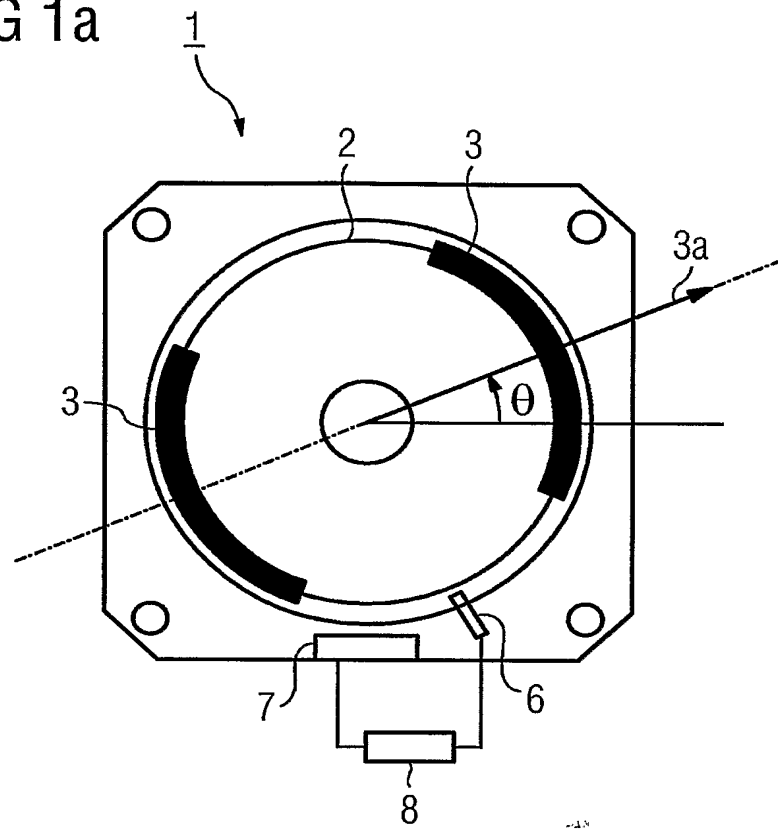


FIG 1b

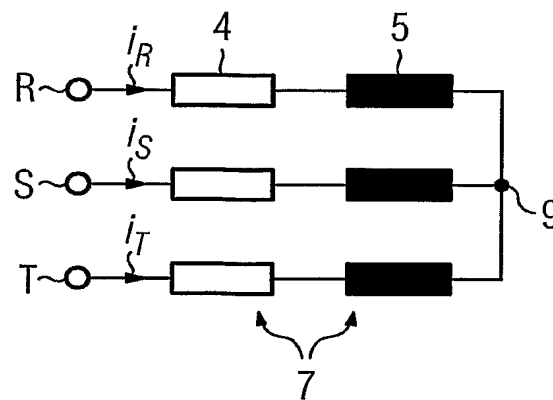


FIG 2

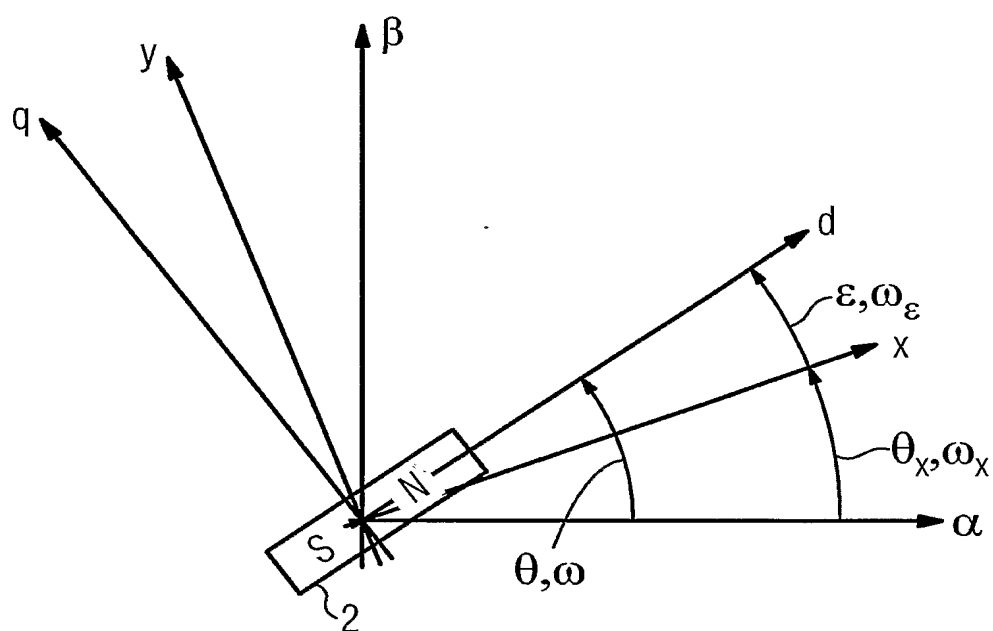


FIG 3

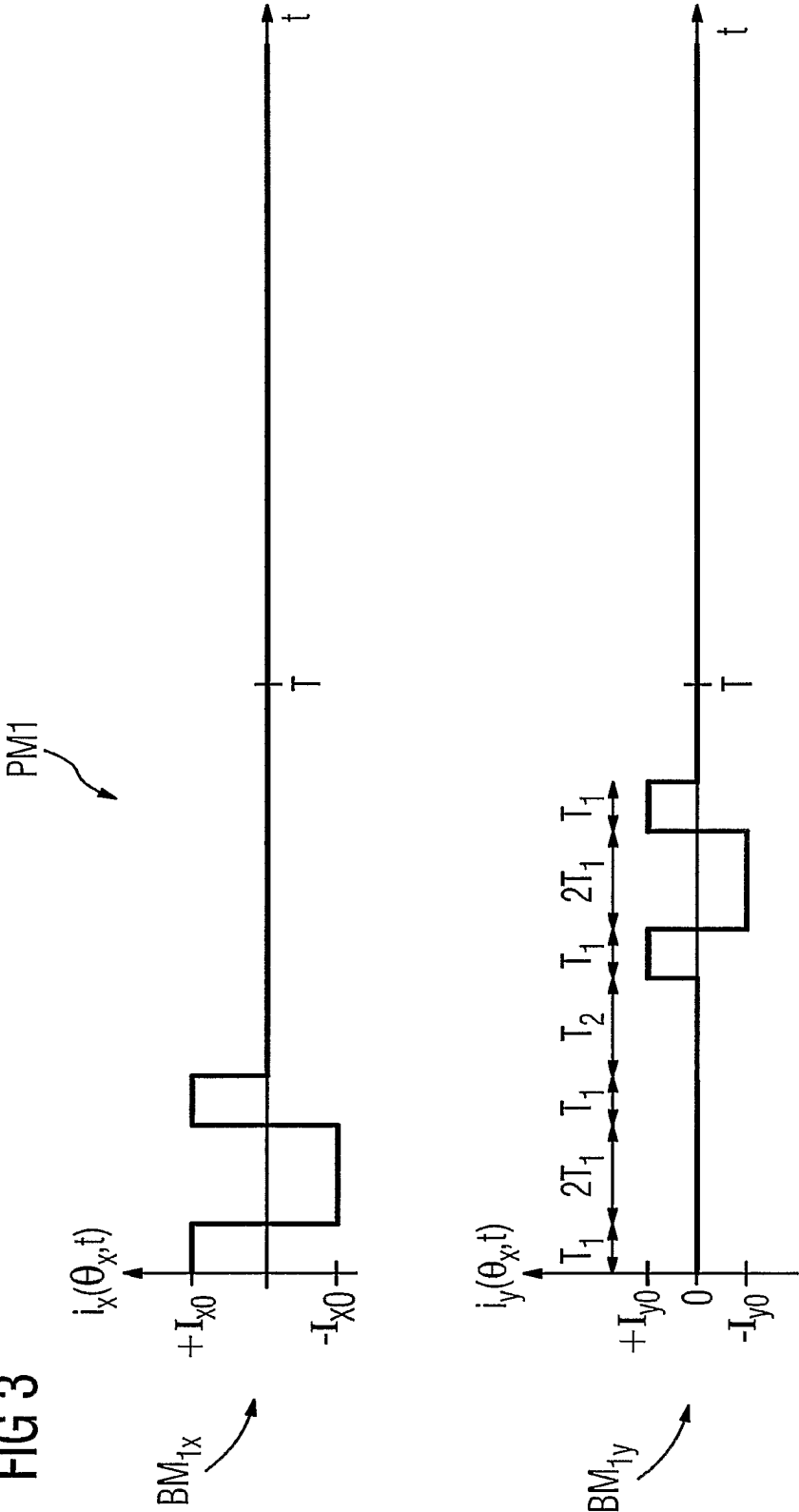
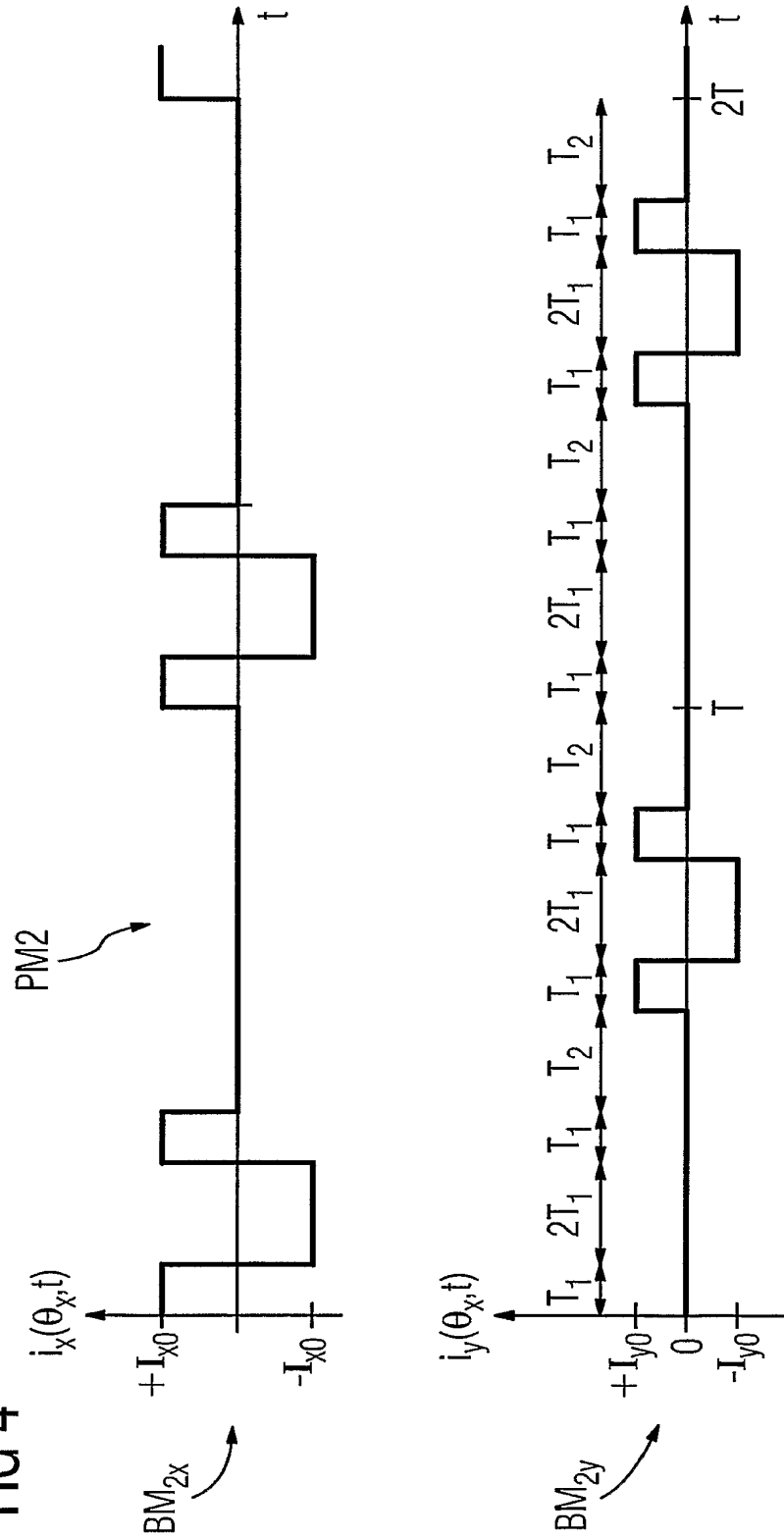
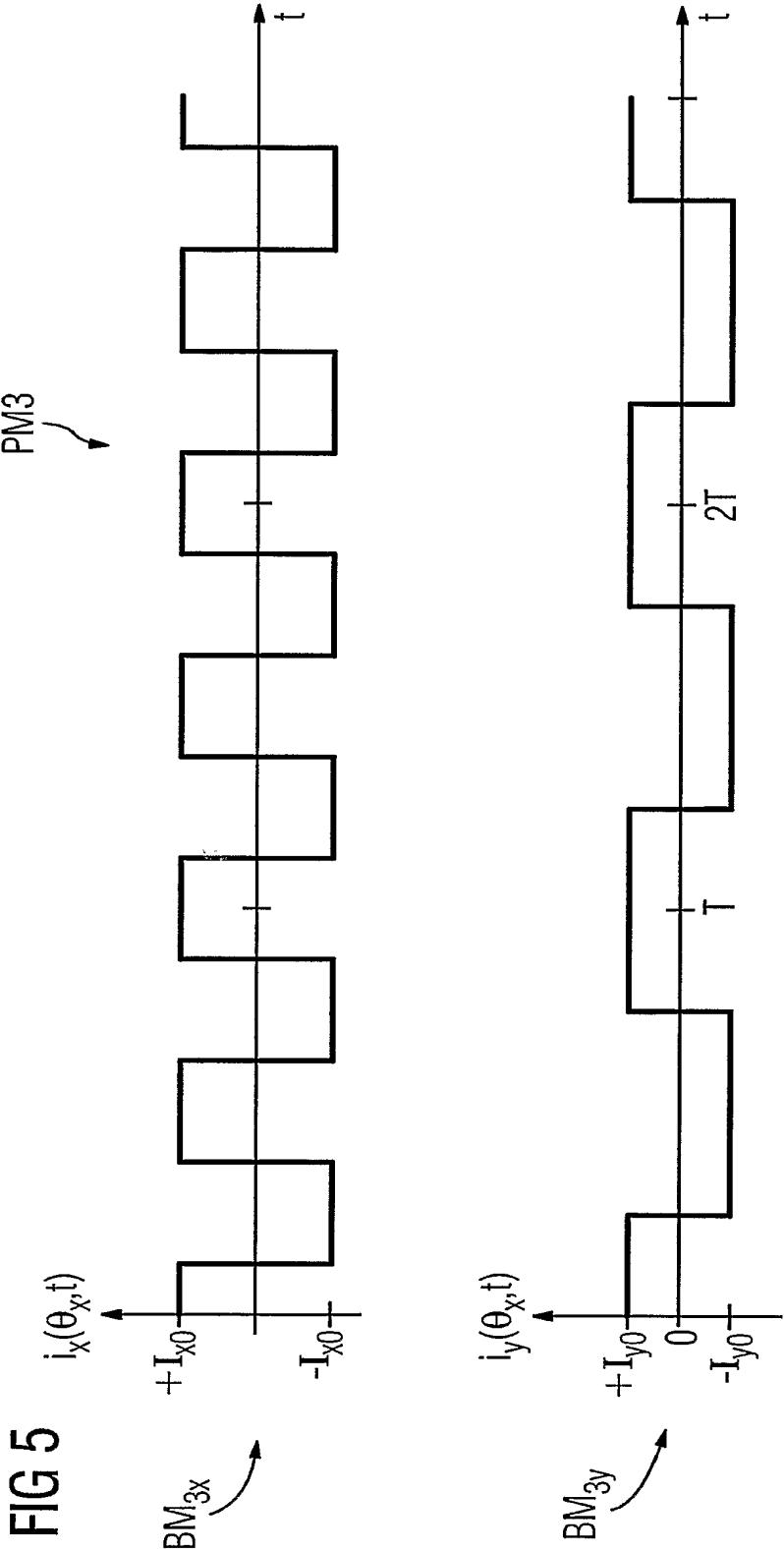


FIG 4





INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No
PCT/EP2005/051017

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

IPC 7 H02P6/18

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC 7 H02P

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 4 617 499 A (YUASA ET AL) 14 October 1986 (1986-10-14) column 2, line 30 - column 5, line 31; figures 1-8	1,20
A	US 4 703 235 A (WISNER ET AL) 27 October 1987 (1987-10-27) column 2, line 4 - column 4, line 62	1,20
A	US 2003/227286 A1 (DUNISCH PAUL ET AL) 11 December 2003 (2003-12-11) paragraph '0022! - paragraph '0041!; figures 1-8	1,20
	----- -/--	

☒ Further documents are listed in the continuation of box C.

☒ Patent family members are listed in annex.

* Special categories of cited documents :

- *A* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- *E* earlier document but published on or after the international filing date
- *L* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- *O* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- *P* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

- *T* later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
- *X* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
- *Y* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.
- *Z* document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

2 August 2005

Date of mailing of the international search report

12/08/2005

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Davis, A

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No
PCT/EP2005/051017

C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	<p>WO 03/052919 A (ROBERT BOSCH GMBH; HEIDRICH, TORSTEN) 26 June 2003 (2003-06-26) page 9, line 3 - page 21, line 16; figures 1-10</p> <p>-----</p>	1,20
A	<p>DE 44 37 793 A1 (AKTIENGESELLSCHAFT FUER INDUSTRIELLE ELEKTRONIK AGIE LOSONE BEI LOCARN) 15 May 1996 (1996-05-15) cited in the application</p> <p>-----</p>	
A	<p>DE 101 56 782 C1 (SIEMENS AG) 17 April 2003 (2003-04-17) cited in the application</p> <p>-----</p>	

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No
PCT/EP2005/051017

Patent document cited in search report		Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 4617499	A	14-10-1986	JP 61132064 A DE 3584663 D1 EP 0183277 A2 KR 9404782 B1	19-06-1986 19-12-1991 04-06-1986 28-05-1994
US 4703235	A	27-10-1987	NONE	
US 2003227286	A1	11-12-2003	DE 10219091 A1	20-11-2003
WO 03052919	A	26-06-2003	DE 10162380 A1 WO 03052919 A2 EP 1459436 A2 JP 2005513986 T US 2004113576 A1	03-07-2003 26-06-2003 22-09-2004 12-05-2005 17-06-2004
DE 4437793	A1	15-05-1996	CN 1127954 A ,C DE 59504058 D1 EP 0708521 A1 JP 3174258 B2 JP 8214600 A US 5874821 A	31-07-1996 03-12-1998 24-04-1996 11-06-2001 20-08-1996 23-02-1999
DE 10156782	C1	17-04-2003	EP 1312925 A1 US 2003094940 A1	21-05-2003 22-05-2003

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen
PCT/EP2005/051017

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
IPK 7 H02P6/18

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPK) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPK

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
IPK 7 H02P

Recherchierte aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	US 4 617 499 A (YUASA ET AL) 14. Oktober 1986 (1986-10-14) Spalte 2, Zeile 30 - Spalte 5, Zeile 31; Abbildungen 1-8	1,20
A	US 4 703 235 A (WISNER ET AL) 27. Oktober 1987 (1987-10-27) Spalte 2, Zeile 4 - Spalte 4, Zeile 62	1,20
A	US 2003/227286 A1 (DUNISCH PAUL ET AL) 11. Dezember 2003 (2003-12-11) Absatz '0022! - Absatz '0041!; Abbildungen 1-8	1,20
	----- -/--	

☒ Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen

☒ Siehe Anhang Patentfamilie

* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

A Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

E älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

L Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

O Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

P Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

T Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

X Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

Y Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

& Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

2. August 2005

Absenddatum des internationalen Recherchenberichts

12/08/2005

Name und Postanschrift der internationalen Recherchenbehörde
Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

Davis, A

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen
PCT/EP2005/051017

C.(Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	WO 03/052919 A (ROBERT BOSCH GMBH; HEIDRICH, TORSTEN) 26. Juni 2003 (2003-06-26) Seite 9, Zeile 3 - Seite 21, Zeile 16; Abbildungen 1-10 -----	1,20
A	DE 44 37 793 A1 (AKTIENGESELLSCHAFT FUER INDUSTRIELLE ELEKTRONIK AGIE LOSONE BEI LOCARN) 15. Mai 1996 (1996-05-15) in der Anmeldung erwähnt -----	
A	DE 101 56 782 C1 (SIEMENS AG) 17. April 2003 (2003-04-17) in der Anmeldung erwähnt -----	

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2005/051017

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
US 4617499 A	14-10-1986	JP 61132064 A DE 3584663 D1 EP 0183277 A2 KR 9404782 B1	19-06-1986 19-12-1991 04-06-1986 28-05-1994
US 4703235 A	27-10-1987	KEINE	
US 2003227286 A1	11-12-2003	DE 10219091 A1	20-11-2003
WO 03052919 A	26-06-2003	DE 10162380 A1 WO 03052919 A2 EP 1459436 A2 JP 2005513986 T US 2004113576 A1	03-07-2003 26-06-2003 22-09-2004 12-05-2005 17-06-2004
DE 4437793 A1	15-05-1996	CN 1127954 A ,C DE 59504058 D1 EP 0708521 A1 JP 3174258 B2 JP 8214600 A US 5874821 A	31-07-1996 03-12-1998 24-04-1996 11-06-2001 20-08-1996 23-02-1999
DE 10156782 C1	17-04-2003	EP 1312925 A1 US 2003094940 A1	21-05-2003 22-05-2003